

목표 신뢰성에 대한 GFRP 교량 바닥판의 구조 신뢰성 해석 Reliability Analysis on GFRP Bridge Decks for Target Reliability

김상진*, 김진규**
Sang-Jin Kim*, Jin-Kyu Kim**

<Abstract>

Bridge decks are one of the main structural components that are most suitable for utilizing the advantages of FRP materials due to the high strength weight ratio of FRP materials. Design codes for the design of FRP bridge decks should be established to apply FRP materials for bridge decks effectively. At present, design codes are relatively well established for the use of FRP materials as reinforcements in concrete structures. However, design codes have not yet been provided for the structures made of FRP as a main construction material. In this study, for the purpose of preparing design code provisions, reliability analyses were performed to evaluate target level of safety and serviceability on GFRP decks. Based on the results, several guidelines for the development of design codes are suggested.

Keywords : FRP, bridge deck, reliability analysis design criteria, target reliability index

1. 서 론

FRP (Fiber Reinforced Polymer)는 중량 대비 강도가 강하고 부식성에 강하다. 따라서, 해양의 영향을 받아 내부식성이 요구되는 구조물의 경우 FRP를 이용하면 아주 효과적이다. 해양이나 해안에 위치한 교량의 상판은 내부식성이라는 FRP의 장점을 이용하는 데 아주 적합한 주요

구조부재이다.

FRP를 해양에 위치한 교량의 상판에 효과적으로 이용하기 위해서는 FRP 상판 설계를 위한 설계 기준이 마련되어야 한다. FRP는 강재나 철근 콘크리트와 같은 기존의 건설 재료와는 상당히 다르다. 중량 대비 강도가 기존의 재료에 비해서 상당히 크지만 강재에 비해 비교적 탄성계수가 작다. 따라서, 철골 또는 철근 콘크리트 구

* 정희원, 제주대학교 토목환경공학전공 부교수, 공박
E-mail sangjikim@cheju.ac.kr

** 정희원, 영남이공대학 토목과 교수, 공박
E-mail jkkim@ync.ac.kr

* Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental Eng. Cheju National University

** Professor, Dept. of Civil Eng. Yeungnam College of S. & T.

조물과는 달리 주요 설계 인자는 강도가 아니라 사용성이 될 수 있다.

현재 재료자체로서의 FRP의 사용에 대해서는 어느 정도 연구가 되어 있다. 그러나 재료자체가 아닌 구조물의 주요 구조재로서 FRP를 사용하기 위한 설계 기준은 아직 마련되지 않았다. 본 논문에서는 해양구조물에 적합한 GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) 교량 상판의 설계 규정을 마련하기 위하여 안전성과 사용성에 대한 신뢰성 해석을 수행하였다. 이 결과는 해안이나 해양의 영향을 받는 곳에 위치한 경우 효과적인 FRP 교량 상판의 설계 규정을 설정하기 위한 기초 자료로서 사용될 수 있을 것이다.

본 연구는 FRP 교량 상판의 휨 거동에 중점을 둔 신뢰성 해석을 수행하였다. FRP 상판의 설계 예는 처짐 한계를 만족하도록 설계된 것으로 한국건설기술연구원 (2003)에서 선택하였다.

저항 모델은 문헌 조사를 수집된 FRP 재료의 통계적 인자를 사용하여 설정하였다. 고려하여야 할 하중은 사하중과 활하중, 동하중이 있으며 이 중에서 사하중은 FRP 바닥판의 경우 거의 무시할 수 있다. 활하중 모델은 실제 트럭 하중을 측정한 것에 근거하였으며 동하중 모델은 수치모사와 실제 측정에 근거하고 있다. 본 연구를 바탕으로 설계 규정 개발을 위한 설계 목표와 안전율에 대한 기준을 제안하였다.

2. 설계예

구조 신뢰성을 위하여 그 대상 구조물로 한국건설기술연구원 (2003)에서 설정한 GFRP 상판을 선정하였다. Fig. 2.1은 교량의 전체 단면을 보여주고 Fig. 2.2는 교량상판의 세부 단면을 보여준다. 교량은 단순지지되어 있으며 교량의 총폭은 12m이고 주형의 간격은 2.5m이며 주형의 길이는 40m이다. FRP 교량 상판의 단면에서 플랜지와 복부판의 두께는 각각 15mm와 11mm이며 복부판의 간격은 160mm이다.

FRP 바닥판은 탄성계수가 작기 때문에 설계 시 사용성 즉 처짐에 대한 검토가 우선적으로 수행된다. 처짐에 대한 검토시 사용된 한계값은 AASHTO (1996)에서 규정한 지간/800으로서 바닥판의 지간 2.5m에 대해서는 3.1mm이다. 구조해석에 사용된 설계하중은 도로교 설계기준 (건설교통부, 2000)에 규정된 표준트럭하중

DB-24를 사용하였으며 이는 AASHTO (1996)의 HS20 하중보다 약 1.3배 무겁다.

구조해석에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였으며 FRP 구조물의 해석에 적합한 S4R 요소를 사용하였다. 교량 상판의 최대 처짐은 2.2m이며 이는 허용값 3.1mm의 71%정도로 처짐조건을 만족하였다. 또한 파괴에 대한 안전도를 검토하기 위하여 Tsai-Hill 파괴해석을 수행한 결과 최대 Tai-Hill 파괴지수는 0.09로서 파괴 강도 1.0보다 훨씬 작은 값이다. 설계된 바닥판의 해석 결과 처짐은 지간/1136이며 파괴강도에 대한 안전율은 11.1의 아주 큰 값을 나타낸다.

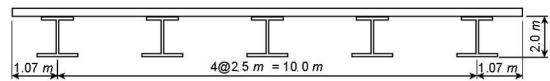


Fig. 2.1 Bridge Cross Section.

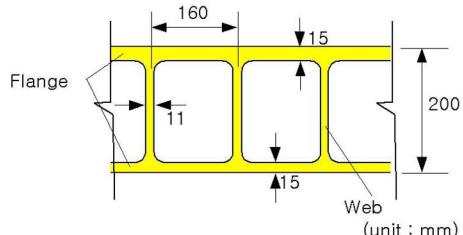


Fig. 2.2 Cross Section of FRP Deck.

3. 하중모델과 저항모델

구조물은 설계기준에 규정된 안전성과 사용성에 대한 조건을 만족하도록 설계되어야 한다. 이것은 구조물의 저항이 대응되는 하중효과보다 크도록 하는 것을 의미한다. 하중과 저항은 어느 정도의 불확실성을 포함하고 있는 확률변수이다. 따라서, 안전성은 확률이론에 근거한 신뢰성 해석으로 구한 신뢰성 지수로 대개 표현된다. 신뢰성 해석을 수행하기 위하여 먼저 하중과 저항에 대한 확률적 모델이 정립되어야 한다.

일반적으로 교량 상판의 설계에 적용되어야 할 하중으로는 고정하중과 활하중, 동하중이 있다. FRP 교량 바닥판의 경우 고정하중의 크기는 다른 하중에 비하여 아주 적어 무시할 수 있다. 따

라서, 본 연구에서는 하중은 활하중과 동하중을 고려하였다.

3.1 활하중 모델

FRP 바닥판은 주형 위에 획으로 설치되어 연속적으로 연결된다. 그리고 횡방향의 FRP 바닥판의 설계를 지배하는 하중은 두 개의 후륜하중이다. 신뢰성 해석을 위한 후륜하중에 대한 활하중 모델을 정립하기 위하여 실제 트럭의 축하중을 측정하였다. 트럭의 축하중 측정에는 Bridge WIM (Weigh-In-Motion)을 사용하였다 (Kim et al., 1996; Nowak et al., 1994). 이 방법을 이용한 측정은 기사가 인식하지 못하게 은밀하게 진행되어 측정결과의 표본에 대한 객관성이 뛰어나다. 차량의 총중량, 축중량과 차축거리에 대한 통계자료를 구하였다. FRP 바닥판의 경우 활하중은 전체 차량의 중량이나 형상보다는 축중량 특히 후륜하중과 관계된다.

측정된 축중량은 지역에 따라 변하였으며 평균은 40 kN에서 55 kN사이의 값이었다. 13군데에서 측정한 축중량의 최대값은 95 kN에서 220 kN사이의 값이었다. 최대 축중량의 평균값은 약 200 kN이었으며 변동계수 (C.O.V., Coefficient of Variation, 평균에 대한 표준편차의 비율)는 약 0.12였다.

앞축을 제외하면 축중량은 대개 4개의 차륜 하중의 합이다. 따라서 윤하중은 축하중의 0.25로서 계산할 수 있다. 평균 최대 윤하중은 50 kN이고 2륜의 최대 중량은 100 kN이다. 윤하중의 변동계수는 0.12이다.

3.2 동하중 모델

동하중 모델은 Hwang과 Nowak (1991)의 수치모사에 근거하고 있다. 이 수치적 모사는 실험결과와 비교하여 입증되었다. 동하중은 활하중에 추가되는 등가의 정적하중으로 고려한다. Nowak (1993)은 트럭 2대 재하의 경우 평균 동하중을 평균 활하중의 0.1로 취하였고 트럭 1대 재하의 경우 평균 활하중의 0.15로 취하였다. 또한 노면조건 등의 불확실성을 고려하여 수치모사에서 나온 값보다 훨씬 큰 변동계수인 0.8을 취하였다. 바닥판의 설계에는 트럭 전체보다는 윤하중에 관련되어 있으므로 트럭 1대가 재하되는 경우의 동적 효과와 유사하다. 따라서 FRP 바닥판의 신뢰성 해석에서는 평균 동하중을 평균 활하중의 0.15로 취하고 변동계수는 0.8로 취하였다.

3.3 하중조합

활하중(윤하중)과 동하중의 최대값 조합은 활하중과 동하중에 대한 통계값을 이용하여 구할 수 있다. 활하중 모델은 정적 활하중 L과 활하중 해석 인자 P의 두 파라미터의 곱으로 표현된다고 가정한다. P의 평균값은 1.0이고 변동계수는 0.12이다. LP의 변동계수 V_{LP} 는 다음 공식에서 계산할 수 있다.

$$V_{LP} = \sqrt{V_L^2 + V_P^2} \quad (1)$$

여기서 V_L =활하중의 변동계수이고 V_P =활하중 해석 인자의 변동계수이다. 따라서 윤하중에 대한 변동계수 $V_L=0.12$ 와 활하중 해석 인자의 변동계수 $V_P=0.12$ 를 적용하면 활하중 LP의 변동계수 V_{LP} 는 0.17이 된다.

활하중과 동하중의 평균 최대 (LP+I)값은 평균 활하중에 1.15를 곱한 값이다. 최대 (LP+I)값에 대한 표준편차 σ_{LP+I} 는 다음과 같이 계산한다.

$$\sigma_{LP+I} = \sqrt{\sigma_{LP}^2 + \sigma_I^2} \quad (2)$$

여기서 $\sigma_{LP} = V_{LP}m_{LP}$; m_{LP} 는 평균 LP로 P의 평균이 1이므로 L의 평균과 같다. $\sigma_I = V_I m_I$, 동하중의 표준편차, V_I =동하중의 변동계수, m_I =동하중의 평균이다.

(LP+I)의 변동계수 V_{LP+I} 는 다음과 같이 구한다.

$$V_{LP+I} = \frac{\sigma_{LP+I}}{m_{LP+I}} \quad (3)$$

위의 식을 이용하여 구한 변동계수 V_{LP+I} 는 0.21이다.

3.4 저항 모델

FRP 바닥판의 휨 거동은 단면2차모멘트, 단면계수와 같은 단면성질 뿐만아니라 재료의 성질에 영향을 받는다. FRP 상판은 직교이방성으로 제조되며 직교이방성 재료에서 중요한 성질은 섬유방향과 섬유방향에 직각인 방향에서의 탄성계수, 인장강도, 포화순 비이다. FRP 상판의 경우 횡방향 설계가 되므로 중요한 성질은 섬유방향의 재료 성질이다. 국내에서 생산된 E-Glass/ Epoxy에 대하여 실제 수행된 실험을 근거로 한 통계 자료를 Table 1에 나타내었다 (한국건설기술연구원, 2003).

KS 실험법에 의한 값이 다른 두 실험 방법(ISO, ASTM)에 비하여 다소 실험결과의 변동성은 크지만

안전측의 값으로 판명되었다. 그러나 어느 방법을 사용하든 간에 측정된 변동성이 작은 것으로 판단할 때 품질의 균질성과 품질관리가 잘 되고 있음을 알 수 있다. 결국 국내에서도 아주 품질이 우수한 FRP 상판을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Table 1. Statistical Data on Material Properties Parallel with Fibers

Test Properties		ISO	ASTM	KS
Elastic Modulus (E1)	Bias Factor (λ)	1.22	1.23	1.07
	Mean (MPa)	48,530	49,174	42,370
	Coefficient of Variation (%)	2.48	3.47	8.53
Poisson's Ratio (μ)	Mean	0.3279	0.3378	0.3420
	Coefficient of Variation (%)	4.8102	4.6955	9.6778
Tensile Strength (F1t)	Bias Factor (λ)	0.98	1.01	0.74
	Mean (MPa)	1,074	1,109	819
	Coefficient of Variation (%)	7.83	7.45	8.14

4. 구조신뢰성 해석

FRP 바닥판은 크게 나누어 처짐으로 인한 사용성 한계 초과와 허용응력초과로 인한 파괴로 나눌 수 있으며 각각의 한계상태에 대하여 구조신뢰성 해석을 수행하였다.

Table 2는 신뢰성 해석에 사용한 변수의 특성치를 나타내고 있다. 탄성계수는 정규분포로 후륜하중은 대수정규분포로 취하였으며 후륜하중의 변동계수는 단면치수의 변동성을 고려하여 여러 교량지점에서 관측된 값보다 다소 큰 0.2를 사용하였다. 재료의 강도는 대수정규분포로 가정하였으며 변동계수는 다소 보수적인 값으로 10%를 취하였다. 평균계수(Bias Factor, 평균/공칭)는 1.0을 취하였다.

Table 2. Statistical Data for Reliability Analysis

Variables	Mean/Nominal	Coefficient of Variation	Distribution
Elastic Modulus (E)	1.07	0.0853	Normal
Rear Wheel Load (L)	1.05	0.2	Lognormal
Strength of Material (σ_u)	1.0	0.1	Lognormal

4.1 처짐 한계상태에 대한 신뢰성 해석

일반적으로 구조물 처짐의 한계상태는 사용성의 문제이며, 구조물의 파괴에 대한 극한 상태의 문제 가 아니므로 처짐에 대한 신뢰성해석을 수행하지는 않는다. 그러나 FRP 바닥판의 설계에 있어서는 사용성으로서의 처짐이 가장 중요한 설계요인으로 인식되어 본 논문에서는 처짐에 대한 신뢰성 해석을 수행하였다.

FRP 바닥판의 처짐에 대한 한계상태함수 g 는 식 (4)와 같다. g 가 0보다 크면 안전측이고 0보다 작으면 불안전하다.

$$g = \Delta_a - \Delta_d \quad (4)$$

여기서 Δ_a 는 허용처짐이며 확정론적 수치이다. Δ_d 는 설계된 FRP 바닥판에서 발생되는 처짐값이다.

FRP 바닥판은 파괴될때까지 선형탄성 상태를 유지하기 때문에 임의의 하중에 대한 처짐이나 응력값을 알면 다른 크기의 하중으로 인한 처짐이나 응력은 비례식으로 간단히 구할 수 있다. FRP 바닥판의 처짐 Δ_d 는 활하중과 재료성질과 단면치수의 함수이며 활하중의 크기에 비례하고 FRP 바닥판의 탄성계수에 반비례한다. 이것을 식으로 나타내면,

$$\Delta_d = \frac{L}{E} \times AF \quad (5)$$

여기서 L 은 활하중으로서 후륜하중이고 E 는 FRP 바닥판의 탄성계수이며 확률변수이다. AF 는 활하중과 탄성계수를 제외한 처짐계산에 영향을 미치는 모든 다른 인자를 나타낸 상수로서 단면의 치수와 형상, 거더 간격 등의 영향이 포함되어 있다. 거더 간격의 경우는 치수의 변동성이 작아 상수로 취급 할 수 있으며 단면의 치수 또한 FRP 바닥판이 공장에서 엄격한 품질관리에 따라 생산되어 변동성이 작아 상수로 취급할 수 있다. 따라서 AF 는 상수로 취급되며 이 값은 공칭값을 이용하여 처짐을 계산하는 식 (5)에서 구할 수 있다.

$$AF = \frac{(\Delta_d)_{nominal}}{\left(\frac{L}{E}\right)_{nominal}} = (\Delta_d)_{nominal} \left(\frac{E}{L} \right)_{nominal} \quad (6)$$

여기서 아래첨자 nominal은 각 변수에 대한 공칭값을 나타낸다. 식 (6)을 식 (5)에 대입하고 이것을 다시 식 (4)에 대입하면 한계상태함수는 다음과 같아 된다.

$$g = \Delta_a - \frac{L}{E} \frac{(\Delta_d)_{nominal}}{\Delta_d} \Delta_d \left(\frac{E}{L} \right)_{nominal} \quad (7)$$

식 (7)의 양변에 E/Δ_a 를 곱하여 다시 한계상태함수를 형성할 수 있다.

$$g = E - L \times \frac{(\Delta_d)_{nominal}}{\Delta_a} \left(\frac{E}{L} \right)_{nominal} \quad (8)$$

식 (8)에서 확률변수는 탄성계수 E 와 활하중 L 이며 정규화률변수와 대수화률변수이다. 따라서 신뢰성 해석은 비선형 한계상태함수와 비정규화률변수에도 적용 가능한 Rackwitz와 Fiessler (1978)의 방법을 사용하였다. 이 방법은 비선형 한계상태함수의 경우 설계점에서 비정규화률변수를 정규화률변수로 근사시켜 반복법으로 신뢰성 지수를 계산한다. 설계점은 파괴 경계점(한계상태함수)상의 최대 확률점이다. 파괴경계점이란 한계상태함수가 0인 점이다.

Rackwitz와 Fiessler (1978)의 방법을 사용하여, 식 (8)의 한계상태함수의 대수정규화률변수인 활하중 L 을 가정한 설계점 L^* 에서 정규화률변수로 근사시키면 평균 \bar{L}' 과 표준편차 $\sigma_{L'}$ 는 각각 식 (9)와 (10)으로 구할 수 있다.

$$\bar{L}' = L^* - \sigma_{L'} \frac{\ln L^* - \bar{\ln L}}{\sigma_{\ln L}} \quad (9)$$

$$\sigma_{L'} = L^* \sigma_{\ln L} \quad (10)$$

여기서 $\bar{\ln L}$ 과 $\sigma_{\ln L}$ 은 L 을 로그 취했을 경우에 대한 평균과 표준편차이다.

식 (8)의 모든 변수가 근사화되었으므로 신뢰성 지수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\beta = \frac{\bar{E} - \bar{L}'}{\Delta_a} \frac{(\Delta_d)_{nominal}}{\left(\frac{(\Delta_d)_{nominal}}{\Delta_a} \left(\frac{E}{L} \right)_{nominal} \right)^2 \sigma_{L'}^2} \quad (11)$$

여기서 \bar{E} 와 σ_E 는 각각 정규화률변수인 탄성계수 E 의 평균과 표준편차이다.

가정한 설계점 L^* 에서 식 (11)로부터 신뢰성 지수 β 를 구한 후 새로운 설계점 L^* 을 식 (12)와 같이 계산한 후 신뢰성 지수를 구하는 과정을 L^* 값이 변화가 없을 때까지 반복한다.

$$L^* = \bar{L}' + \frac{\beta \sigma_{L'}^2 \frac{(\Delta_d)_{nominal}}{\Delta_a} \left(\frac{E}{L} \right)_{nominal}}{\sqrt{\sigma_E^2 + \left[\frac{(\Delta_d)_{nominal}}{\Delta_a} \left(\frac{E}{L} \right)_{nominal} \right]^2 \sigma_{L'}^2}} \quad (12)$$

Fig. 3은 허용처짐 대비 설계처짐값의 변화에 따른 신뢰성 지수의 변화를 나타낸다. 허용처짐 대비 설계처짐값이 0.6의 의미는 설계처짐값이 허용처짐

값의 60%의 처짐이 되도록 설계하는 것을 말하며 아직 허용처짐의 40%만큼 여유있게 설계된 것을 뜻 한다. 정확히 허용처짐만큼의 단면을 설계했을 경우의 신뢰성 지수는 0.4로서 아주 작은 값이다. 이것은 허용처짐을 초과할 확률이 50%가 조금 안될 정도로 큰 값을 의미한다. 처짐이 비록 지배적인 FRP 설계조건이지만 강도한계상태가 아닌 사용성한계상태이므로 허용처짐만큼의 단면설계시 신뢰성 지수가 0.4라는 값은 크게 놀랄만한 일은 아니다. 2절의 설계예의 경우 계산된 처짐은 허용 처짐값의 약 71% 정도이다. 따라서 이것에 대응되는 신뢰성 지수는 Fig. 3에서 약 2.0이다. 이것은 강도한계보다는 처짐 한계가 FRP 바닥판의 설계를 지배한다는 것을 의미한다.

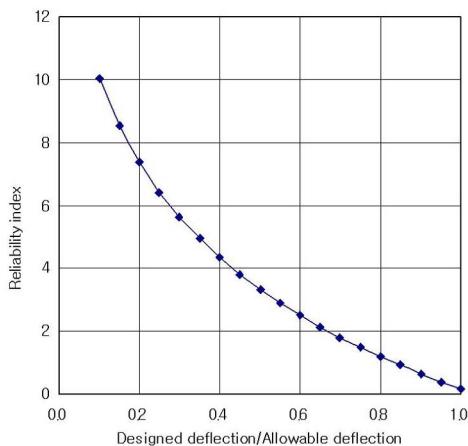


Fig. 3 Reliability Index for Deflection.

4.2 응력한계상태에 대한 신뢰성 해석

FRP 바닥판의 응력에 대한 한계상태함수 g 는 식 (13)와 같다. g 가 1보다 크면 안전측이고 1보다 작으면 불안전하다.

$$g = \frac{\sigma_u}{\sigma_d} \quad (13)$$

여기서 σ_u 는 재료의 강도이고 σ_d 는 설계된 FRP 바닥판에서 발생되는 응력값이다.

FRP 바닥판의 응력 σ_d 는 활하중 L 과 단면치수의 합수이며 활하중의 크기에 비례한다. 이것을 식으로 나타내면 식 (14)와 같다.

$$\sigma_d = L \times AFS \quad (14)$$

여기서 AFS는 활하중을 제외한 응력계산에 영향을 미치는 모든 다른 인자를 나타낸 상수이다. AFS는 단면의 치수와 형상, 거더 간격 등의 영향이 포함되어 있다. 거더 간격의 경우는 치수의 변동률이 크지 않으며 단면의 치수 또한 FRP 바닥판이 공장에서 염격한 품질관리에 따라 생산되어 변동률이 아주 작으므로 상수로 취급될 수 있다. 이 외에 탄성계수와 같은 재료의 성질이 있으나 이 값에 따라 응력값이 변하는 것은 아니며 처짐에만 영향을 미친다. 따라서 AFS는 공칭응력 $(\sigma_d)_{nominal}$ 과 허용응력 σ_a 가 같다는 조건에서 구할 수 있다. 즉,

$$(\sigma_d)_{nominal} = L_{nominal} \times AFS = \sigma_a \quad (15)$$

식 (15)에서 AFS를 구하면

$$AFS = \frac{\sigma_a}{L_{nominal}} \quad (16)$$

허용응력 σ_a 은 재료의 공칭강도 $(\sigma_u)_{nominal}$ 를 안전율 FS로 나누어 구한다. 즉,

$$\sigma_a = \frac{(\sigma_u)_{nominal}}{FS} \quad (17)$$

식 (17)을 식 (16)에 대입한 후 식 (16)을 식 (14)에 대입하고 다시 식 (14)를 식 (13)에 대입하면

$$g = (FS) \frac{\sigma_u}{(\sigma_u)_{nominal}} \frac{L_{nominal}}{L} \quad (18)$$

여기서 재료의 강도 σ_u 과 활하중 L은 확률변수이고 나머지 다른 공칭값은 상수이다. FRP 바닥판의 경우에 활하중 L은 후륜하중이다.

식 (18)의 한계상태함수에서 신뢰성 지수는 안전율에 따라 증가한다는 것을 알 수 있다. 또한 한계상태가 휨응력이나 전단응력 등의 어떤 응력인가에 대한 구분이 필요 없이 모든 응력한계상태에 대하여 동일한 한계상태함수가 적용됨을 알 수 있다.

식 (18)의 양변에 로그를 취하여 한계상태함수를 다시 형성하면

$$g = \ln(FS) + \ln \sigma_u - \ln (\sigma_u)_{nominal} - \ln L + \ln L_{nominal} \quad (19)$$

σ_u 와 L가 대수정규확률변수이므로 식 (19)의 한계상태함수는 정규확률변수의 선형함수이다. 따라서 신뢰성 지수 β 는 다음과 같이 바로 계산된다.

$$\beta = \frac{\ln(FS) + \ln \sigma_u - \ln (\sigma_u)_{nominal} - \ln L + \ln L_{nominal}}{\sqrt{(\sigma_{\ln \sigma_u})^2 + \sigma_{\ln L}^2}} \quad (20)$$

여기서 $\ln \sigma_u$ 과 $\ln L$ 은 각각 σ_u 와 L을 로그 취했을 때의 평균이다. $\sigma_{\ln \sigma_u}$ 와 $\sigma_{\ln L}$ 는 각각 재료의 강도 σ_u 와 하중 L을 로그 취했을 때의 표준편차이다.

재료의 강도 σ_u 의 변동계수 V_{σ_u} 가 0.2보다 작을 때 $\ln \sigma_u \cong \ln (\sigma_u)_{nominal}$ 이다. 따라서, 식 (20)의 분자의 두 번째 항과 세 번째 항에서

$$\begin{aligned} \ln \sigma_u - \ln (\sigma_u)_{nominal} &= \ln \overline{\sigma_u} - \ln (\sigma_u)_{nominal} \\ &= \ln \frac{\overline{\sigma_u}}{(\sigma_u)_{nominal}} \\ &= \ln \lambda_{\sigma_u} \end{aligned} \quad (21)$$

여기서 λ_{σ_u} 는 재료의 강도 σ_u 에 대한 편중계수이다.

식 (20)의 분모에서

$$\sigma_{\ln \sigma_u} = \sqrt{\ln(V_{\sigma_u}^2 + 1)} \quad (22)$$

식 (21)와 (22)를 식 (20)에 대입하면

$$\beta = \frac{\ln(FS) + \ln \lambda_{\sigma_u} - \ln L + \ln L_{nominal}}{\sqrt{\ln(V_{\sigma_u}^2 + 1) + \sigma_{\ln L}^2}} \quad (23)$$

식 (23)에서 신뢰성 지수 β 를 계산하기 위해서 재료의 강도 자체가 필요하지는 않다. 단지 재료의 강도에 대한 변동계수와 편중계수만 필요하다.

식 (23)를 이용하여 재료의 강도 대비 허용응력값의 변화에 따른 신뢰성 지수를 계산하여 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 가로축은 안전율 FS의 역수인 극한응력대비 허용응력이다. 재료의 극한응력대비 허용응력값이 0.2라는 의미는 허용응력을 재료의 공칭 극한응력의 20%로 하여 설계한 것으로 안전율 FS가 5.0일 때이다. 이때의 신뢰성 지수는 7.0 보다 크다. FRP 상판의 설계가 주로 처짐에 의해 지배되며 처짐 한계상태를 만족하는 바닥판의 경우 발생되는 응력이 극한 응력의 20% 미만인 경우가 대부분이다. 따라서 대부분의 경우 응력에 대한 신뢰성 지수는 7보다 큰 값으로 대단히 큰 안전 여유를 갖고 있다. 2절의 FRP 바닥판의 설계예의 경우 파괴지수 1에 대하여 계산된 값은 0.09에 불과하다. 이 경우를 Fig. 4에서 읽으면 신뢰성 지수가 10을 초과할 정도로 대단히 큰 안전 여유를 갖고 있다고 할 수 있다. 비록 파괴 양상이 축성파괴일지라도 이 정도의 신뢰성 지수이면 충분하다고 할 것이다. 따라서 설계를 지배하는 것은 결국은 처짐이 된다는 것을 알 수 있다.

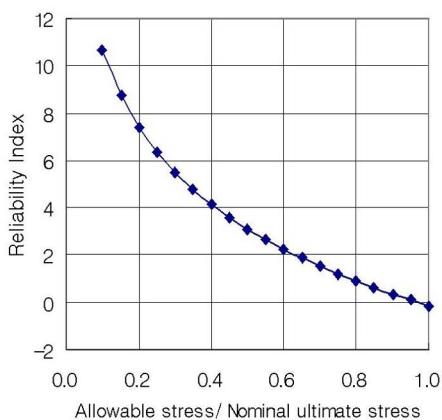


Fig. 4 Reliability Index for Stress

5. 목표신뢰성 지수와 안전율의 고찰

설계 기준이 달성하고자 하는 신뢰성이 목표 신뢰성이며 이는 비용과 신뢰성을 동시에 고려할 경우의 최적값이다. 실제적으로는 목표 신뢰성을 이론적으로 결정하는 것은 아주 어려우므로 기존 구조물에 대한 경험을 바탕으로 결정된다. 따라서, FRP 구조물의 목표신뢰성지수를 결정하기 위해서는 과거 시공 예로부터 축적된 성능과 안전도를 평가하여야 하나, 현재까지 건설 분야에서의 활용실적은 부족한 것으로 평가된다. 현실적인 방안으로는 직교 이방성의 재료특성이나 취성파괴의 특성이 유사한 목재구조물에 대한 구조신뢰성해석을 통하여 상호 비교함으로 목표 신뢰도를 유추해 볼 수 있을 것이다.

FRP 바닥판은 목재 바닥판의 경우 같이 직교 이방성의 재료특성과 취성파괴 양상을 보이는 점등 상대적으로 유사한 점이 많다. 목재 바닥판의 신뢰성 지수는 3.6에서 6.1까지의 변화를 나타낸다 (Nowalk et al, 1997). 또한 취성 연결부의 경우도 6 이상의 목표 신뢰성 지수를 갖는다 (AAHTO, 1996).

목재바닥판과 연결부의 신뢰성지수는 일반적인 교량구조물의 신뢰성지수인 3.5정도에 비해 매우 큰 값을 보여준다. 따라서 FRP 바닥판의 목표 신뢰성지수는 목재바닥판이나 연결부와 같이 재료의 장기특성이 불확실하고 파괴양상이 취성인 점을 고려하여 6.0 이상의 큰 값을 적용해야 할 것으로 평가된다. 물론 장기적인 실적에 의해

안전측으로 판명되면 향후에 어느 정도 감소된 목표 신뢰성지수를 채택할 수 있을 것이다. 취성파괴와 열화효과를 고려하고 아직은 시공실적이 부족한 점을 고려하여 목재바닥판보다 다소 큰 7.0을 용력이나 재료파괴에 대한 목표 신뢰성 지수로서 제안한다. Fig. 4에서 신뢰성 지수 7.0에 해당하는 경우의 허용용력은 공칭 극한용력의 0.2이다. 이것은 안전율 5.0에 해당한다.

처짐에 대한 목표 신뢰성 지수는 처짐 한계의 설정과 연관지어 결정되어야 한다. 이것은 처짐한계가 용력 한계상태와 달리 사용성 한계상태이어서 구조물의 직접적인 파괴로 이어지지 않으므로 주관적인 한계 설정을 필요로 하기 때문이다. 안전율 1.0을 적용할 경우, 즉 설계 처짐값을 허용 처짐값과 같게 되도록 설계할 경우의 신뢰성 지수를 Fig. 3에서 읽으면 0.4이다. 즉, 처짐 한계상태를 초과할 확률이 약 50%가 조금 안된다는 것을 뜻한다. 처짐에 대한 목표 신뢰성 지수는 0.0을 제안한다. 그러나 목표 신뢰성 지수와 더불어 중요한 값은 처짐 한계의 기준값이다. 따라서, 다소 엄격한 처짐 한계를 설정하고 안전율을 1.0으로 설계하는 것이 기존의 다른 재료에 대한 설계와의 일관성 측면에서 유리하다.

6. 결 론

- 극한용력의 0.09배의 용력이 발생하는 바닥판 설계예의 경우 용력에 대한 신뢰성 지수는 10.0이 넘는 큰 값을 갖는다. 그러나 처짐은 허용값의 71%로서 이것에 해당되는 신뢰성 지수는 약 2.0이다. 이것은 FRP 교량 상판의 설계를 지배하는 것은 강도 기준이 아니라 처짐 한계임을 입증한다.
- 용력에 대한 신뢰성 해석과 기존의 유사한 구조물에 대한 신뢰성 지수를 검토한 결과 FRP 교량 상판의 강도에 대한 목표 신뢰성 지수로서 7.0을 제안하며 이것에 해당되는 안전율은 5.0을 제안한다.
- 처짐의 경우 기존의 다른 재료에 대한 설계의 일관성을 유지하기 위해 안전율을 1.0으로 하는 것을 제안한다. 안전율 1.0에 대한 신뢰성 지수는 약 0.0로서 한계상태를 초과할 확률이 약 50%이다. 처짐에 대하여 낮은 안전율과 목표 신

뢰성 지수를 적용하는 대신에 다소 엄격한 처짐
한계의 기준값을 사용하여야 한다.

후 기

본 논문은 2004년도 제주대학교 학술연구비에
의해 연구되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 건설교통부 (2000). 도로교설계기준. 한국건설
기술연구원 (2003). 장수명 합리화 바닥판 개
발(II), 연구보고서, 건기연 2003-050.
- 2) AASHTO (1996). Standards Specifications
for Highway Bridges, 16th ed., American
Association of State Highway and
Transportation Officials, Washington D.C.
- 3) Hwang, E-S., and Nowak, A-S. (1991).
"Simulation of Dynamic Load for Bridges",
ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.
117, No.5, pp.1413~1434.
- 4) Kim, S., Sokolik, A.F., and Nowak, A.S. (1996).
"Measurement of Truck Load on Bridges in
Detroit, Michigan", Transportation Research
Record 1541, TRB, National Research Council,
Washington, D.C., pp. 58~63.
- 5) Nowak, A.S., Kim, S., Saraf, V., and Ritter,
M. (1997). Load Distribution for Plank
Decks, Report UMCEE 97-11, Department
of Civil Engineering, University of
Michigan, Ann Arbor, Michigan.
- 6) Nowak, A.S., Kim, S-J., Laman, J.A. (1994).
Truck Loads on Selected Bridges in the Detroit
Area, Report UMCE 94-34, Department of Civil
Engineering, University of Michigan, Ann
Arbor, Michigan.
- 7) Nowak, A.S. (1993). Calibration of LRFD Bridge
Design Code, NCHRP 12-33, Department of
Civil Engineering, University of Michigan, Ann
Arbor, Michigan.
- 8) Rackwitz, R. and Fiessler, B. (1978).
"Structural Reliability under Combined
Random Load Sequences", Computers and
Structures, Vol. 9, pp. 489~494.

(2006년 10월 19일 접수, 2007년 2월 23일 채택)